دانشگاه الزهرا (س)

دانشکده فنی و مهندسی ، گروه مهندسی صنایع

پایان نامه

جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

رشته مهندسی صنایع

عنوان

مدلسازی قابلیت اطمینان سیستمهای پیچیده

شبکه برق ایران

استاد راهنما:

دکتر محمد علی صنیعی منفرد

دانشجو:

زهره علیپور

اسفند۱۳۹۰

بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه الزهرا (س)

دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی صنایع

پایان نامه

جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

رشته مهندسی صنایع

عنوان

مدلسازی قابلیت اطمینان سیستمهای پیچیده

شبکه برق ایران

استاد راهنما:

دکتر محمد علی صنیعی منفرد

استاد مشاور:

دکتر مهدی سیف برقی

دانشجو:

زهره علیپور

اسفند ۱۳۹۰

کلیه دستاوردهای این تحقیق متعلق به دانشگاه

الزهرا (س) است.

صورتجلسه دفاعیه

تقدیم به

مادر مهربانم که صبر و پشتکار و گذشت را به من آموخت،

پدر مهربانم که همواره آرامش بخش و پشتیبان من بوده است،

همسرم که با همفکری های خود همیشه همراه من بوده است،

و

دخترم، رونیکا، که با حضور خود به زندگیم معنایی تازه بخشید.

تقدیر و تشکر

از **پروفسور استیون اشتروگاتس** از دانشگاه کورنل امریکا به خاطر معرفی گروه تحقیقاتی پروفسور ایان دابسون روی شبکه برق در مکاتبه با استاد راهنمای بنده کمال تشکر و امتنان را دارم.

از **پروفسور محمود فتوحی فیروز آباد** استاد درس قابلیت اطمینان دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی شریف ، به خاطر راهنمایی ها و مساعدت در تهیه نقشه تک خطی شبکه برق ایران و حضور در جلسه دفاع پایان نامه بی نهایت سپاسگزارم.

از **دکتر مهدی جلیلی** استادیار دانشکده مهندسی کامپیوتر دانشگاه صنعتی شریف، به خاطر همکاریهای فراوان در پیشبرد این تحقیق بسیار متشکرم.

از **پروفسور انریکو زیو** از دانشکده انرژی دانشگاه پلی تکنیک میلان ایتالیابه دلیل راهنمایی ها و همکاری های ایشان در بهبود این تحقیق سپاسگزارم.

از زحمات و راهنمایی های بی دریغ استاد ارجمند جناب آقای دکتر محمد علی صنیعی متقرد که در طی

انجام این پروژه راهنمای من بودند، کمال تشکر را می نمایم.

چکیده

از سال ۲۰۰۰ میلادی رویکرد جدیدی تحت عنوان سیستمهای پیچیده در مورد شبکه های بزرگ مقیاس همچون شبکه های برق، حمل و نقل، اینترنت، لوله های نفت و گاز و ... مطرح شده است. اهمیت قابلیت اطمینان و آسیب پذیری در چنین شبکه هایی ضرورت انجام مطالعات در این حوزه را نشان میدهد. تحلیل آسیب پذیری شبکه برق به عنوان یک سیستم پیچیده و یک مبحث فرا رشته ای نیازمند دانش مهندسی برق، مهندسی صنایع، مهندسی کامپیوتر، فیزیک و ریاضیات می باشد. شبکه قدرت را می توان به عنوان مهمترین و تاثیرگذارترین شبکه واقعی در نظر گرفته و تحلیل آسیب پذیری این شبکه را در برابر انواع خرابی ها امری ضروری تلقی نمود.

برای اولین بار در کشور، این رساله خطوط فشار قوی (۴۰۰kV) را از نظر آسیب پذیری و قابلیت اطمینان با رویکرد سیستمهای پیچیده مورد بررسی قرار داده است. رفتار شبکه برق ایران نسبت به خرابی های عمدی و تصادفی شناسایی شده و باسها بر اساس اهمیتشان در شبکه رتبه بندی شده اند. با مدلسازی شبکه پیچیده برق ایران در سه سطح ۴۰۰kV,۲۳۰kV,۴۰۰+۲۳۰kV ، نوع گراف، ساختار آن و رفتار شبکه تحلیل شده است. در تحلیل آسیب پذیری شبکه در سطح ۴۰۰kV، تاثیر خرابی های عمدی و تصادفی گرهها (باسها) بررسی شده است. اطمینان شبکه را نیز با در نظر گرفتن نرخ خرابی به عنوان وزن لینکها (خطهای انتقال) و محاسبه مقادیر مرکزیت بر پایه قابلیت اطمینان با رویکرد زیو و به تبع آن رتبه بندی گرههای کلیدی با روش بوردا کانت و تحلیل آسیب پذیری شبکه نسبت به خرابی گرههای کلیدی بررسی شده است.

دستاوردهای حاصل از این تحقیق می تواند راهنمای مدیران شبکه برق در سطح کلان کشور از دیدگاه مدیریت ، امنیت ، بهبود و توسعه شبکه باشد.

فهرست مطالب

فهرست جداول..... ...م

فهرست شکل ها .....ع

فصل اول آشنایی با شبکه برق و قابلیت اطمینان ۱

۱.۱.مقدمه ای بر قابلیت اطمینان ۲

۱.۲.آشنایی با شبکه برق ۸

۱.۳ قابلیت اطمینان در شبکه های برق ۱۷

۱.۴. انواع خرابیها در سیستم قدرت ۱۹

۱.۵. روشهای سنتی در مقابل روشهای نوین..... ۲۷

جمع بندی..... ۳۵

فصل دوم : شبکه های پیچیده ۳۷

۲.۱. تاریخچه شبکه های پیچیده..... ۳۸

۲.۲. تعریف شبکه های پیچیده..... ۴۰

۲.۳. انواع شبکه های پیچیده ۴۰

۲.۴. مقادیر و شاخص های شبکه های پیچیده ۴۴

۲.۵. مدلسازی شبکه های پیچیده ۵۱

۲.۶. آسیب پذیری شبکه های پیچیده ۵۵

جمع بندی..... ۵۹

فصل سوم خصوصیات ساختاری شبکه انتقال ایران با رویکرد سیستمهای پیچیده..۶۰

۳.۱. معرفی شبکه برق ایران ۶۱

۳.۲. بررسی ساختار شبکه برق ایران (۴۰۰KV) ۶۵

۳.۳.تحلیل آسیب پذیری شبکه برق ایران در سطح یک ۸۱

جمع بندی ۸۲

فصل چهارم تحلیل آسیب پذیری شبکه برق ایران از دیدگاه توپولوژی شبکه ۸۴

۴.۱. بررسی میزان شکنندگی شبکه برق ایران ۸۵

۴.۲. بررسی رفتار شبکه نسبت به خرابیهای عمدی و تصادفی ۹۰

۴.۳. بررسی خرابیهای آبشاری ۹۷

جمع بندی ۹۸

فصل پنجم قابلیت اطمینان و آسیب پذیری شبکه ایران (۴۰۰کیلوولت) ۹۹

۵.۱. شاخصهای مرکزیت بر پایه قابلیت اطمینان ۱۰۱

۵.۲. بررسی قابلیت اطمینان شبکه برق ایران ۱۰۲

۵.۳. بررسی آسیب پذیری شبکه برق ایران ۱۱۸

جمع بندی ۱۲۵

فصل ششم: نتیجه گیری و تحقیقات آتی ۱۲۶

مراجع ۱۳۳

پیوستها..... ۱۳۸
ABSTRACT ۱۶۲

فهرست جداول

جدول۱- ۱ . تعداد کتابها و مقالات در زمینه قابلیت اطمینان.....۳

جدول۱-۲ علل خرابی شبکه برق ۲۰

جدول ۱-۳ شاخصهای قابلیت اطمینان در سطح تولید ۲۳

جدول ۱-۴ شاخصهای قابلیت اطمینان در سطح دوم ۲۴

جدول ۱-۵ شاخصهای قابلیت اطمینان در سطح توزیع..... ۲۵

جدول۱-۶ مشابهت های شبکه قدرت با مدل توده شن..... ۳۰

جدول ۱-۷ لیست مقالات در حوزه قابلیت اطمینان سیستم قدرت با رویکرد کلاسیک بین سالهای ۱۹۷۲ تا ۲۰۱۱ ..... ۳۱

جدول۲-۱ مقادیر ضریب خوشه بندی ، متوسط کوتاهترین مسیر و قطر گراف ER..... ۵۳

جدول ۲-۲ فرمولهای مقادیر بحرانی در خرابیهای عمدی و تصادفی..... ۵۷

جدول ۲-۳ براورد تجربی و پیش بینی مقادیر بحرانی در خرابیهای عمدی و تصادفی ۵۸

جدول ۳-۱ شاخص های تولید قدرت در ایران برای سال های۱۳۸۹ و ۱۳۸۸..... ۶۱

جدول ۳-۲ سهم تولید نیروگاههای مختلف کشور در سال ۱۳۸۸ و ۱۳۸۹ ..... ۶۱

جدول ۳-۳ طول خطوط و ظرفیت پستهای شبکه انتقال و فوق توزیع ۶۳

جدول ۳-۴ TOOLBOX نرم افزار ۶۹

جدول ۳-۵ معرفی قسمتهایی از نرم افزار ۷۱

جدول ۳-۶ بخشی از برنامه نوشته شده برای رسم شبکه برق ایران با فرمت NET..... ۷۱

جدول ۳-۷ مقادیر متوسط کوتاهترین مسیر، میانگین درجه، ضریب خوشه بندی، قطر، اثربخشی کلی و محلی برای شبکه در سطح ۴۰۰ کیلوولت ۷۴

جدول ۳-۸ مقایسه ساختار شبکه خطوط انتقال فشار قوی ایران با سه کشور اروپایی، ایتالیا، فرانسه و اسپانیا ۷۴

جدول ۳-۹ درجه باسها و فراوانی درجه برای شبکه برق ایران در سطح ۴۰۰ کیلوولت ۷۵

جدول ۳-۱۰ مقادیر احتمال کوتاهترین مسیر شبکه برق ایران در سطح ۴۰۰ کیلوولت ۷۹

جدول ۳-۱۱ مقدار بیتوینس و فراوانی گرهها در سطح ۴۰۰ کیلوولت ۷۹

جدول ۳-۱۲ مقدار کلوزنسو اطلاعات و فراوانی گرهها در سطح ۴۰۰ کیلوولت..... ۸۰

جدول ۳-۱۳ مقادیر میانگین درجه، متوسط کوتاهترین مسیر ، ضریب خوشه بندی ، حداکثر درجه و قطر چهار زیر شبکه مربوط به شبکه اصلی برق ایران در سطح ۴۰۰ کیلوولت ۸۲

جدول ۴-۱ فرمول محاسبه درصد بحرانی برای خرابیهای تصادفی و عمدی..... ۸۶

جدول ۴-۲ برآورد تجربی و پیش بینی شده برای تابع نمایی در فرمول محاسبه درصد بحرانی برای خرابیهای تصادفی و عمدی ۸۷

جدول ۴-۳ برآورد تجربی و پیش بینی شده برای تابع نمایی در فرمول محاسبه درصد بحرانی برای خرابیهای تصادفی و عمدی در شبکه برق ایران در سطح ۴۰۰ کیلوولت..... ۸۸

جدول ۴-۴ مقایسه گراف ایران با چند کشور اروپایی از نظر مقدار میانگین درجه و شاخص γ ۹۰

جدول ۵-۱ شاخصهای مرکزیت بر پایه توپولوژی و قابلیت اطمینان ۱۰۱

جدول ۵-۲ محاسبه قابلیت اطمینان خطوط انتقال برق ایران در سطح ۴۰۰ کیلوولت..... ۱۰۳

جدول ۵-۳ لیست گرههای مهم و کلیدی..... ۱۱۴

جدول ۵-۴ دسته بندی گرهها با توجه به مقدار امتیاز کل به هشت زیر گروه ۱۱۶

جدول ۵-۵ زمان انجام محاسبات مقادیر مرکزیت و تحلیل آسیب پذیری و قابلیت اطمینان ۱۲۴

جدول ۶-۱ ویژگیهای شبکه در سطح ۲۳۰ کیلوولت ۱۲۸

جدول ۶-۲ ویژگیهای شبکه در سطح ۲۳۰ کیلوولت ۱۳۱

جدول ۶-۳ ویژگیهای شبکه خطوط فشار قوی ایران در سه سطح ۱۳۱

فهرست شکل ها

شکل ۱-۱انواع توابع توزیع شکست ۷

شکل ۱-۲توابع توزیع تجمعی، تابع چگالی احتمال و نرخ شکست برای توزیعنمایی.....۷

شکل ۱-۳ شبکه برق از نیروگاه تا مصرف کننده ۸

شکل ۱-۴ بخش های تولید، انتقال و توزیع در شبکه برق.....۹

شکل ۱-۵ انواع نیروگاهها..... ۱۰

شکل ۱-۶ انواع پستها ۱۴

شکل ۱-۷ نمایی از یک ترانسفورمر ۱۴

شکل ۱-۸ سطوح مختلف ولتاژ در شبکه برق ۱۵

شکل ۱-۹ ارتباط بین توان اکتیو، توان راکتیو و توان کل ۱۵

شکل ۱-۱۰ قسمتهای مختلف ایستگاه فرعی توزیع..... ۱۶

شکل ۱-۱۱تقسیم بندی مطالعات در حوزه قابلیت اطمینان سیستم..... ۱۸

شکل ۱-۱۲ مطالعات در حوزه امنیت شبکه برق ۱۹

شکل ۱-۱۳ منحنی وانی شکل چرخه عمر محصول..... ۲۱

شکل ۱-۱۴ سطوح مختلف سیستم قدرت در مطالعات قابلیت اطمینان ۲۲

شکل ۱-۱۵مدل سیستم در مطالعات قابلیت اطمینان در سطح تولید ۲۳

شکل ۱-۱۶مدل محاسبه شاخصهای قابلیت اطمینان در سیستم تولید ۲۴

شکل ۱-۱۷ طبقه بندی مطالعات اخیر انجام شده در حوزه سیستم قدرت ۲۹

شکل ۲-۱ تاریخچه شبکه های پیچیده ۳۸

شکل ۲-۲ (مساله هفت پل: چهار شهر A,B,C,D با کمک هفت پل به یکدیگر متصل شده اند. آیا می توان مسیری یافت که از این هفت پل تنها یک بار عبور کرد؟ ۳۸

شکل ۲-۳ انواع گراف جهت دار، بدون جهت، وزن دار $G(۶,۸)$ ۴۱

شکل ۲-۴ شبکه های در حال رشد ۴۱

شکل ۲-۵ انواع شبکه های پیچیده ۴۳

شکل ۲-۶ تابع توزیع تجمعی نمایی (شبکه برق) و پاورلو (شبکه اینترنت) ۴۷

شکل ۲-۷ انواع گراف منظم ۵۲

شکل۲-۸ فرایند تغییر لینکها و تبدیل گراف از منظم شبکه ای دایره ای به تصادفی با تعداد یکسان گره و لینک ۵۳

شکل ۲-۹ انواع شبکه های جهان کوچک: تک مقیاس، چند مقیاس و بی مقیاس ۵۴

شکل ۲-۱۰ انواع آسیب پذیری شبکه های پیچیده ۵۵

شکل ۲-۱۱ انواع مقاومت پذیری شبکه ها ۵۶

شکل ۲-۱۲ منحنی F بحرانی نسبت به مقادیر γ برای خرابیهای عمدی و تصادفی ۵۸

شکل ۳-۱ انواع نیروگاههای تولید برق ایران ۶۱

شکل ۳-۲ قدرت نامی و تولید ناویژه نیروگاههای کشور ۶۲

شکل ۳-۳ توزیع سنی خطوط در سطوح مختلف ولتاژی و روند افزایش طول خطوط ۶۴

شکل ۳-۴ فروش انرژی به تفکیک تعرفه ها در سال ۱۳۸۹ ..... ۶۵

شکل ۳-۵ نقشه جغرافیایی شبکه تولید و انتقال ایران ۶۶

شکل ۳-۶ نمودار تک خطی شبکه تولید و انتقال بخشی از ایران (تهران) در سال ۱۳۹۰ ..... ۶۷

شکل ۳-۷ آرم و نشان نرم افزار PAJEK ۶۸

شکل ۳-۸ نمونه هایی از شبکه های رسم شده باPAJEK..... ۶۸

شکل ۳-۹ نمایی از صفحه نرم افزار ۷۰

شکل ۳-۱۰ گراف شبکه برق ایران در سطح ۴۰۰ کیلوولت ۷۲

شکل ۳-۱۱ تفکیک گرهها در شبکه برق ایران بر اساس درجه ۷۳

شکل ۳-۱۲ موقعیت ایران بین سه کشور اروپایی ۷۴

شکل ۳-۱۳ هیستوگرام درجه شبکه برق ایران در سطح ۴۰۰ کیلوولت..... ۷۶

شکل ۳-۱۴ تابع توزیع چگالی احتمال درجه گرهها شبکه برق ایران در سطح ۴۰۰ کیلوولت۷۶

شکل ۳-۱۵ تابع توزیع تجمعی درجه برای شبکه ایران در سطح ۴۰۰ کیلوولت..... ۷۸

شکل ۳-۱۶ تابع توزیع چگالی احتمال کوتاهترین مسیر بین گرهها در سطح ۴۰۰ کیلوولت ۷۹

شکل ۳-۱۷ نمودار هیستوگرام بیتوویننس گرهها در سطح ۴۰۰ کیلوولت ۸۰

شکل ۳-۱۸ نمودار هیستوگرام کلوزنس و اطلاعات گرهها در سطح ۴۰۰ کیلوولت..... ۸۱

شکل ۳-۱۹ لینکهای حساس و آسیب پذیر در شبکه برق ایران در سطح ۴۰۰ کیلوولت..... ۸۲

شکل ۴-۱ ، تابع توزیع تجمعی درجه برای شبکه ایران در سطح ۴۰۰ کیلوولت ۸۷

شکل ۴-۲ شکل شبکه پس از حذف F درصد از گرههای مهم بر اثر خرابیهای عمدی به ازای مقادیر مختلف F (۰.۰۲۸ و ۰.۰۶ و ۰.۱ و ۰.۱۵ و ۰.۲۰ و ۰.۲۵۹۸)..... ۹۲

شکل ۴-۳ شکل شبکه پس از حذف F درصد از گرههای مهم بر اثر خرابیهای تصادفی به ازای مقادیر مختلف F (۰.۱ و ۰.۲۰ و ۰.۳ و ۰.۴ و ۰.۵ و ۰.۶۱) ۹۳

شکل ۴-۴ اثربخشی شبکه برق ایران نسبت به خرابیهای عمدی (ستاره های آبی رنگ) و تصادفی(ستاره های بنفش)، اثربخشی شبکه تصادفی ER با ۱۰۵ گره و ۱۴۲ لینک نسبت به خرابیهای عمدی (دایره مشکی) و خرابیهای تصادفی (دایره های قرمز رنگ)..... ۹۵

شکل ۴-۵ضریب خوشه بندی شبکه برق ایران نسبت به خرابیهای عمدی (ستاره های آبی رنگ) و تصادفی(ستاره های بنفش)، ضریب خوشه بندی شبکه تصادفی ER با ۱۰۵ گره و ۱۴۲ لینک نسبت به خرابیهای عمدی (دایره مشکی) و خرابیهای تصادفی (دایره های قرمز رنگ) ۹۶

شکل ۴-۶ اندازه بزرگترین عنصر متصل در شبکه(G) محاسبه شده و بر اساس تابعی از مقدار α..... ۹۸

شکل ۵-۱ بررسی مقدار مرکزیت درجه بر پایه توپولوژیکال و بر پایه قابلیت اطمینان برای تمام گرهها ۱۰۴

شکل ۵-۲ بررسی ارتباط بین مقدار مرکزیت درجه بر پایه توپولوژیکال و بر پایه قابلیت اطمینان ۱۰۴

شکل ۵-۳ بیست باس مهم دارای بالاترین رتبه از دید مقدار مرکزیت درجه بر پایه قابلیت اطمینان ۱۰۵

شکل ۵-۴ بررسی مقدار کلوزنس بر پایه توپولوژیکال و بر پایه قابلیت اطمینان برای تمام گرهها ۱۰۶